
Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar

T.M. Razafimbelo⁽¹⁾, A. Albrecht⁽¹⁾, I. Basile⁽²⁾, D. Borschneck⁽²⁾, G. Bourgeon⁽³⁾, C. Feller⁽⁴⁾, H. Ferrer⁽¹⁾, R. Michellon^{(5),(6)}, N. Moussa⁽⁶⁾, B. Muller⁽³⁾, R. Oliver⁽³⁾, C. Razanamparany⁽⁶⁾, L. Seguy⁽³⁾ et M. Swarc⁽⁷⁾

- (1) IRD - UR 179 SeqBio, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France
- (2) CEREGE-CNRS-Université Paul Cezanne-Aix-Marseille III, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, B.P. 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4, France
- (3) CIRAD - UPR Recyclage et risque, TA 40/01, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France
- (4) IRD, Ambatoroka, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar
- (5) CIRAD, Ampandrianomby, BP 853, 101 Antananarivo, Madagascar
- (6) ONG TAFA, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar
- (7) CIRAD - Laboratoire d'analyse, TA 40/01, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France

RÉSUMÉ

Stocker du carbone dans le sol permet d'améliorer ses propriétés physico-chimiques et de réduire les émissions de dioxyde de carbone vers l'atmosphère. L'effet des systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur le stockage de C dans le sol est étudié sur un dispositif agronomique de longue durée (11 ans) à Antsirabe, Madagascar (16 °C, 1 300 mm). Quatre systèmes sont étudiés : un système en labour conventionnel avec exportation des résidus de récolte [CT m/s, rotation maïs (*Zea mays* L.)-soja (*Glycine max.* L.)], et trois systèmes en SCV sans travail du sol, et avec restitution des résidus de récolte [NT m/s, rotation maïs-soja ; NT m/m-d, rotation maïs-maïs avec une couverture végétale de *Desmodium uncinatum* ; et NT h/s-k, rotation haricot (*Phaseolus vulgaris*)-soja avec une couverture végétale de *Pennisetum clandestinum*]. Le sol est très argileux, à faible capacité d'échange cationique mais possédant des propriétés andiques pouvant influencer les potentialités de stockage du C du sol. A 0-5 cm, les teneurs en C sont plus élevées sous SCV (NT m/s, NT m/m-d et NT h/s) que sous labour (CT m/s), et à 5-10 cm, elles sont plus élevées sous NT m/m-d et NT m/s que sous NT h/s-k et CT m/s. Le stockage annuel de C, à masse de sol équivalente, est de 0,69 et 1,01 mg C.ha⁻¹.an⁻¹, sous NT m/s et NT m/m-d pour l'horizon équivalent à 0-20 cm, alors qu'il n'y a pas d'effet SCV observé pour l'horizon équivalent à 0-40 cm. Ceci peut être dû à la fois à l'absence réelle de stockage comme à une variabilité initiale des teneurs en C dans les horizons de profondeurs, car le labour n'est effectué que jusqu'à 20 cm de profondeur. Les différences de stockage de C entre NT et CT dans la couche 0-20 cm sont essentiellement attribuées aux quantités beaucoup plus importantes de résidus organiques restituées par les systèmes NT par rapport au système labouré CT, mais on peut aussi envisager qu'une partie de cette différence soit le fait d'une perte de C par érosion sous labour. Les teneurs en macroagrégats stables (MA, 200-2 000 µm) sont plus élevées sous NT m/s, NT h/s-k et NT m/m-d que sous CT m/s à 0-5 cm et à 5-10 cm. Cette teneur en MA est corrélée positivement ($R = 0,408$, $p < 0,05$, $n = 24$) avec la teneur en C du sol, ce qui pourrait induire (i) une amélioration de l'agrégation en fonction de l'augmentation de la teneur en C du sol et (ii)

une protection du C se trouvant à l'intérieur de ces agrégats contre la minéralisation microbienne. Toutefois, la respirométrie ne montre pas une protection physique de C dans les sites de protection supérieurs à 200 μm pour NT m/s et CT m/s. Dans cette étude, le C stocké dans le sol pourrait alors être protégé contre la minéralisation par d'autres processus comme l'adsorption sur les colloïdes du sol ou la récalcitrance biochimique de la matière organique du sol.

Mots clés

Sols tropicaux, stocks de carbone, semis direct, agrégation, protection physique du carbone

SUMMARY

SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN NO-TILLAGE SYSTEMS IN A CLAYEY SOIL, MADAGASCAR

Soil organic carbon (SOC) storage can improve soil properties and reduce agriculture's contribution to CO_2 emissions. The long term (11 years) effect of no-tillage systems on soil C storage is studied for a clayey subtropical (16°C , $1\,200\text{ mm.y}^{-1}$) soil in Antsirabe (Madagascar). Four treatments were studied : (i) control (CT m/s) : annual rotation of maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max*) with conventional tillage and residues exported, (ii) the same rotation with no tillage and residues not exported (NT m/s), (iii) a maize/maize rotation with legume (*Desmodium uncinatum*) permanent cover crop in no-tillage and residues not exported (NT m/m-d), (iv) and a common bean (*Phaseolus vulgaris*)/soybean rotation with kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) permanent cover crop in no-tillage and residues not exported (NT h/s-k). The studied soil was very clayey, with low cationic exchange capacity and andic properties. SOC content was generally high and was significantly greater in no-tillage systems (NT m/s, NT m/m-d and NT h/s-k) than in CT m/s at 0-5 cm depth, and significantly greater in NT m/m-d and NT m/s than in NT h/s-k and CT m/s at 5-10 cm depth. The rates of SOC storage for NT m/s and NT m/m-d were respectively 0.69 and 1.01 $\text{mg C.ha}^{-1}.\text{year}^{-1}$ at 0-20 cm (in equivalent soil mass). No significant differences of SOC stocks were found at 0-40 cm, probably related to a low effect of NT on soil C storage, but also probably to spatial variability of soil C content below 20 cm depth, because tillage-depth do not exceed 20 cm. The differences of soil C stock between NT and CT systems at 0-20 cm depth were mainly attributed to the important quantity of crop residues left on soil surface in NT systems, while above-ground residues were removed for CT system, but C losses by erosion have to be taken in account. Water-stable macroaggregates (MA, 200-2 000 μm) were significantly greater in NT m/s, NT h/s-k and NT m/m-d than in CT m/s at 0-5 cm depth and 5-10 cm depth and were positively correlated with SOC content ($R = 0.408$, $p < 0.05$, $n = 24$). This correlation suggested (i) that soil aggregate stability increased with the increasing of soil C content, and (ii) water-stable aggregates protected physically C inside aggregate structure against microbial attack. The C physically protected inside aggregates larger than 200 μm was very low for both NT m/s and CT m/s systems. This small protection level suggested that C stored in no-tillage systems might be protected from mineralization by its adsorption on mineral colloid or its biochemical recalcitrance.

Key-words

Tropical soil, carbon stock, no-tillage, aggregation, SOC physical protection, Madagascar

RESUMEN

EFFECTO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVOS CON CUBIERTA VEGETAL SOBRE EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN UN SUELO ARCILLOSO DE LAS ALTAS TIERRAS DE MADAGASCAR

Almacenar carbono en el suelo permite mejorar sus propiedades físico-químicas y reducir las emisiones de dióxido de carbono hacia la atmósfera. Se estudio el efecto de sistemas de siembra directa con cubierta vegetal (SCV) sobre el almacenamiento de C en el suelo estudiado con un dispositivo agronómico de larga duración (11 años) a Antsirabe, Madagascar (16°C , 1300 mm). Se estudiaron cuatro sistemas: un sistema con labranza convencional y exportación de los residuos de cosecha (CT m/s, rotación maíz (*Zea mays* L.) – soja (*Glycine max* L.)), y tres sistemas con SCV sin trabajo del suelo, y con restitución de los residuos de cosecha (NT m/s, rotación maíz – soja; NT m/m-d, rotación maíz – maíz con una cubierta vegetal de *Desmodium uncinatum*; y NT h/s-k, rotación frijol (*Phaseolus vulgaris*) – soja con una cubierta vegetal de *Pennisetum clandestinum*). El suelo es muy arcilloso, con pequeña capacidad de intercambio catiónico, pero con propiedades ándicas que pueden influir las potencialidades de almacenamiento del C del suelo. A 0-5 cm, los contenidos en C son más elevados bajo SCV (NT m/s, NT m/m-d et NT h/s) que bajo labranza (CT m/s), y a 5 - 10 cm, son más elevados bajo NT m/m-d y NT m/s que bajo NT h/s-k y CT m/s. El almacenamiento anual de C, con masa de suelo equivalente, es de 0,69 y 1,01 $\text{Mg C ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, bajo NT m/s et NT m/m-d para el horizonte equivalente 0 - 20 cm, mientras que no hay efecto SCV observado para el horizonte equivalente 0 - 40 cm. Esto puede ser debido a la vez a la ausencia real de almacenamiento como a una variabilidad inicial de los contenidos en C en los horizontes de profundidad, porque la labranza se efectúa solamente hasta 20 cm de profundidad. Las diferencias de almacenamiento de C entre NT y CT en la capa 0 - 20 cm son esencialmente atribuidas a las cantidades mucho más importantes de residuos orgánicos restituidos por los sistemas NT en comparación al sistema arado CT, pero se puede también prever que una parte de esta diferencia sea el hecho de una pérdida de C por erosión bajo labranza. Los contenidos en macroagregados estables (MA, 200-2000 μm) son más elevados

bajo NT m/s, NT h/s-k y NT m/m-d que bajo CT m/s a 0-5 cm y a 5-10 cm. Este contenido en MA se correla positivamente ($R = 0,408$, $p < 0,05$, $n = 24$) con el contenido en C del suelo. Lo que puede inducir (i) un mejoramiento de la agregación en función del aumento del contenido en C del suelo y (ii) una protección del C que se localiza al interior de estos agregados contra la mineralización microbiana. No obstante, la respirometría no muestra una protección física de C en los sitios de protección superior a 200 μm para NT m/s y CT m/s. En este estudio, el C almacenado en el suelo podría así ser protegido contra la mineralización por otros procesos como la adsorción sobre los coloides del suelo o la recalcitrancia bioquímica de la materia orgánica del suelo.

Palabras clave

Suelos tropicales, almacenamiento de carbono, siembra directa, agregación, protección física carbono

La nécessité d'améliorer les stocks de matière organique (MO), et donc du carbone (C), dans le sol est souvent évoquée pour des raisons agricoles. En effet, la MO du sol, de par sa relation étroite avec la fertilité, est un des facteurs importants pour la maîtrise d'une productivité végétale durable. Aussi, de nombreuses recherches concernent l'effet de différents modes de gestion des terres sur les stocks organiques des sols. Par ailleurs, stocker du C d'origine atmosphérique dans le sol, via les restitutions végétales, répond aussi à une problématique environnementale : la lutte contre l'effet de serre. La contribution de l'agriculture et du changement d'usage des terres aux émissions de CO_2 est loin d'être négligeable avec 34 % des émissions (IPCC, 2001) et les régions intertropicales participent pour 50 % de ces dernières. Aussi une gestion raisonnée des agroécosystèmes doit-elle viser à réduire les émissions des gaz à effet de serre et/ou à augmenter leur séquestration dans le système sol-plante. Parmi les alternatives de gestion permettant de stocker du C d'origine atmosphérique dans le système sol-plante, les pratiques de non-labour associées à des systèmes de culture impliquant des couvertures végétales paraissent intéressantes tant pour les milieux tempérés (Balesdent *et al.*, 1999 ; Halvorson *et al.*, 2002 ; Six *et al.*, 2002) que tropicaux (Bayer *et al.*, 2000 ; Sà, 2001 ; Six *et al.*, 2002).

A Madagascar, ces systèmes sont installés en milieu paysan depuis une dizaine d'années sur les pentes des collines (appelées localement « tanety ») des Hautes Terres, traditionnellement consacrées aux cultures pluviales et aux pâturages extensifs. Les systèmes en semis direct avec couverture végétale ou SCV sont des systèmes de culture qui ne comportent pas de travail du sol (par convention, ces systèmes seront nommés NT dans le texte), le sol est recouvert en permanence par une couverture végétale morte (résidus de culture) ou vivante (plante de couverture) et le semis est alors effectué directement à travers cette couverture (Raunet *et al.*, 1998). Ces systèmes pourraient conduire à une augmentation des stocks de C organique des sols grâce à la quantité importante de résidus organiques restitués et à la diminution des pertes en C par minéralisation par l'absence de travail du sol. En effet, le labour semble accélérer la minéralisation de la MO en la rendant

plus accessible à la flore microbienne (Balesdent *et al.*, 1999). Il est donc important d'évaluer l'effet de ces systèmes sur le stockage de C dans le sol, en comparaison avec des systèmes traditionnels impliquant des pratiques de travail du sol (qui seront nommés CT dans le texte).

Toutefois, le stockage de C dans le sol ne devient intéressant que si le C stocké est relativement stabilisé. On parle alors de « protection » du C dans le sol vis-à-vis de la minéralisation. Cette protection dépend de trois processus (Six *et al.*, 2002) :

- une protection dite physico-chimique due à l'association des MO avec les colloïdes minéraux du sol,
- une protection dite biochimique, ou recalcitrance, liée à la composition chimique des MO stockées,
- une protection dite physique due à la localisation de ces MO à l'intérieur ou à l'extérieur des agrégats stables du sol. Concernant cette dernière, des corrélations positives et significatives entre la stabilité des agrégats et la teneur en C du sol ont été signalées, laissant supposer l'existence de ce processus de protection (Feller *et al.*, 1996 ; Albrecht *et al.*, 1998 ; Amézketa, 1999). Cette protection a été mise en évidence directement dans divers travaux (Gupta et Germida, 1988 ; Beare *et al.*, 1994b ; Golchin *et al.*, 1994 ; Chevallier *et al.*, 2004).

L'étude présentée ici concerne des sols argileux des Hautes Terres de Madagascar. Après une caractérisation générale des sols, l'effet des systèmes SCV sur le stockage du C et la stabilité de l'aggrégation seront étudiés, ainsi que le niveau de protection physique du C du sol contre l'attaque microbienne.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation du milieu

L'étude a été menée dans la région d'Antsirabe, au centre des Hautes Terres malgaches, à une altitude de 1 300 m. Le climat de la région est du type subtropical avec deux saisons :

une saison sèche et froide, de mai à septembre, et une saison humide, d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16 °C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche, et maximales de 31 °C pendant la saison humide. La pluviosité moyenne annuelle est de 1 300 mm et les précipitations mensuelles n'excèdent pas 50 mm de mai à septembre.

La région, située dans une région de volcanisme ancien (datant du Pliocène) et récent (moins de 10 000 ans), comprend des sols minéraux bruts, des sols peu évolués, des andosols, des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979), selon la classification française (CPCS, 1967). Toutefois, depuis la réalisation de l'étude de Zebrowski et Ratsimbazafy (1979), certains sols des zones tropicales d'altitude considérés antérieurement comme ferrallitiques humifères se sont avérés être des sols à caractère andique même en absence d'allophanes (Caner et al., 2000). L'identification de ces sols nécessite donc des analyses chimiques spécifiques sur les formes amorphes ou cristallisées du fer, de l'aluminium et de la silice.

Présentation du site expérimental et prélèvements de sol

Au vu de la difficulté de trouver des dispositifs de longue durée permettant la quantification de la séquestration/stockage de C en milieu tropical, la présente étude est effectuée sur un dispositif agronomique mis en place en 1991 par une organisation non gouvernementale malgache Tany sy Fampandrosoana (Tafa) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad), un dispositif permettant des études agronomique, technique et économique comparées entre systèmes en semis direct avec couverture végétale et systèmes de culture conventionnels (labour sans restitution).

Le dispositif étudié est localisé à Andranomanelatra, au nord-est de la ville d'Antsirabe. Il comprend des parcelles d'une surface variant de 30 à 200 m². Quatre systèmes de culture, chacun étant répété 3 fois sur des parcelles élémentaires en randomisation totale, seront étudiés (figure 1, tableau 1) :

- un système en labour conventionnel (CT m/s) où le labour est effectué par traction animale à l'aide d'une charrue à soc jusqu'à une profondeur de 20 cm, sur un système de rotation composé d'une année de culture de maïs (m, *Zea mays* L.) suivie par une année de culture de soja (s, *Glycine max* L.), les résidus de récolte étant exportés de la parcelle,
- un système SCV avec couverture végétale morte, sans travail du sol (NT m/s), sur un système de rotation composé d'une année de culture de maïs suivie par une année de culture de soja, les résidus de récoltes étant restitués à la parcelle pour constituer un mulch,
- un système SCV à couverture végétale vivante de graminée, sans travail du sol (NT h/s-k), sur un système de rotation composé

d'une année de culture de haricot (h, *Phaseolus vulgaris* L.) suivie d'une année de culture de soja. Les résidus de récoltes sont restitués à la parcelle et le sol sous ces deux cultures est recouvert en permanence par une graminée, le kikuyu (k, *Pennisetum clandestinum*),

- un système SCV à couverture végétale vivante de légumineuse, sans travail du sol (NT m/m-d), en culture continue de maïs (m). Les résidus de récoltes sont restitués à la parcelle et le sol est recouvert en permanence par une légumineuse, le desmodium (d, *Desmodium uncinatum*).

Le dispositif comporte 3 niveaux de fertilisation F1, F2 et F3. Seul le niveau F2 est étudié ici. Il consiste en une association de fumier de bovin (à raison de 5 t.ha⁻¹) et d'engrais minéral (NPK). Le soja et le haricot sont fertilisés chimiquement à 30, 31 et 42 kg.ha⁻¹ et le maïs à 70, 31 et 21 kg.ha⁻¹ de N, P et K respectivement. Pour le système CT m/s, les résidus aériens sont exportés. Par contre, ils sont restitués pour les traitements NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k : leur quantité est estimée à partir des rendements en grains à 54, 81 et 77 Mg MS.ha⁻¹ en 11 ans (tableau 2, colonne 2).

L'essai est mis en place sur des sols développés sur des alluvions volcano-lacustres : ces sols ont été décrits par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme des sols ferrallitiques fortement désaturés humifères. Des échantillons de sol ont été prélevés en avril-mai 2003, juste avant la période de récolte (tableau 1). Sur chaque parcelle élémentaire, 4 prélèvements au cylindre correspondant à 4 profils de densité apparente ont été effectués : deux sur les lignes et deux sur les interlignes, à 5 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm, à l'aide de cylindres de 250 cm³ (8 cm de diamètre et 5 cm de hauteur) pour 0-5 et 5-10 cm, et de 500 cm³ (8 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) pour 10-20, 20-30 et 30-40 cm. Chaque échantillon a donné lieu à la détermination de la densité apparente et des teneurs en C et N totaux. Pour la détermination de la stabilité des agrégats et de la respirométrie, un échantillon composite de chaque profondeur sur chaque parcelle a été constitué à partir des quatre prélèvements élémentaires de la parcelle. Les analyses physico-chimiques, minéralogiques et la teneur en eau ont été effectuées sur une des parcelles de répétition du traitement NT m/s aux profondeurs 0-10, 20-30 et 30-40 cm.

Méthodes analytiques

Analyses physico-chimiques

- Les pH eau et KCl 1M ont été mesurés sur un mélange sol/solution selon le rapport 1/2,5.
- Le carbone et l'azote total ont été mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Les sols n'étant pas carbonatés, le C total représente le C organique.
- La granulométrie a été réalisée selon la méthode de la pipette (méthode sur sol séché à l'air) après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à chaud et dispersion à l'hexamétophosphate de sodium. L'argile (0-2 µm) et les limons fins (2-20 µm)

Table 1 - Treatments description and samples used in different analysis in this study.

(1) Fertilisation : Apport de fumier 5Mg.ha⁻¹ et de la fertilisation minérale (N-P-K) à raison de 30-30-40 kg.ha⁻¹ pour soja et haricot et 70-30-20 kg.ha⁻¹ pour le maïs.

Figure 1 - Experimental design. Andranomanelatra, Madagascar (cf. Table 1 for treatments meanings)



Tableau 2 - Biomasses aériennes et racinaires restituées au sol par chaque système, exprimées, en matière sèche (Mg MS.ha⁻¹) et en carbone (Mg C.ha⁻¹). Moyenne \pm écart-type (n=3)

Table 2 - Amount of dry matter (Mg ha⁻¹) and carbon (Mg C.ha⁻¹) of above and under ground biomass returned to soil by each treatment. Mean \pm standard deviation (n=3).

	Aérienne	Racinaire	Aérienne et racinaire ⁽⁶⁾		Δ biomasse	C théorique stocké 15 % ⁽⁷⁾		C théorique stocké 7 % ⁽⁸⁾	
	Mg MS.ha ⁻¹	Mg MS.ha ⁻¹	Mg MS.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹
CT m/s ⁽¹⁾	0,0 \pm 0,0	16,1 \pm 0,9 a	16,1 \pm 0,9 a	8,0 \pm 0,5 a					
NT m/s ⁽²⁾	54,1 \pm 4,0 a	26,7 \pm 3,5 b	80,8 \pm 5,3 b	40,4 \pm 2,7 b	32,4 \pm 2,7 a	4,85 \pm 0,40 a	0,44 \pm 0,04 a	2,27 \pm 0,43 a	0,21 \pm 0,04 a
NT m/m-d ⁽³⁾	80,5 \pm 2,1 c	59,5 \pm 1,5 d	140,0 \pm 2,5 d	70,0 \pm 1,3 d	62,0 \pm 1,3 c	9,29 \pm 0,20 c	0,84 \pm 0,02 c	4,34 \pm 0,31 b	0,39 \pm 0,03 b
NT h/s-k ⁽⁴⁾	77,0 \pm 0,5 b	46,2 \pm 0,2 c	123,1 \pm 0,5 c	61,6 \pm 0,2 c	53,5 \pm 0,5 b	8,03 \pm 0,08 b	0,73 \pm 0,01 b	3,75 \pm 0,19 a	0,34 \pm 0,02 a

(1) CT m/s : conventional tillage, rotation maïs-soja.

(2) NT m/s : No-tillage, rotation maïs/soja.

(3) NT m/m-d : No-tillage, rotation maïs/maïs avec une couverture végétale de desmodium.

(4) NT h/s-k : No-tillage, rotation haricot/soja avec une couverture végétale de kikuyu.

(6) Le facteur de conversion de MS en C est de 0,5.

(7) C théorique stocké estimé à 15 % du C total restitué (Rasmussen et Collins, 1991).

(8) C théorique stocké estimé à 7 % du C total restitué (Kong et al., 2005).

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).

ont été prélevés à la pipette de Robinson et les autres fractions, sables grossiers (200-2 000 μ m), sables fins (50-200 μ m), limons grossiers (20-50 μ m) obtenues par tamisage (Afnor, 2004a).

- Les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et la capacité d'échange cationique (CEC) ont été déterminées par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7. L'aluminium échangeable a été extrait par KCl 1M. Tous les dosages ont été réalisés à l'ICP-AES (inductive coupled plasma - atomic emission spectroscopy).

- La teneur en eau à pF 4,2 a été déterminée par la méthode des plaques poreuses sur des échantillons tamisés à 2 mm (Afnor, 2004b).

- La rétention en phosphore a été déterminée suivant la méthode décrite par Blakemore et al. (1987).

- Les formes du fer, de l'aluminium et de la silice ont été extraites à l'aide de réactifs sélectifs : (i) le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD), ou réactif de Mehra et Jackson (1960), qui permet d'extraire les formes cristallisées et amorphes, notées Fe, Al, Si, (ii) l'oxalate d'ammonium tamponné à pH 3 (McKeague et Day, 1966 ; Blakemore et al., 1987) qui extrait les formes amorphes et micro-cristallines, notées Fe_o, Al_o, Si_o, et (iii) le pyrophosphate de sodium (Wada et Higachi, 1976) qui concerne les formes liées à la matière organique (complexes organo-métalliques) notées Fe_p, Al_p, Si_p.

A partir de ces résultats, divers indices sont calculés :

- l'indice "oxalfe", (Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 1 :

$$\text{« oxalfe \% »} = \text{Al}_o + 1/2 \text{Fe}_o \text{ » (\%)} \quad (1)$$

- la quantité des produits allophaniques (Parfitt et Wilson, 1988 ; Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 2 :

$$\text{« Allophanes \% »} = 7,1 \text{Si}_o \text{ » (\%)} \quad (2)$$

- les quantités de complexes organo-aluminiques (CoAl) pour deux extrêmes du rapport molaire C/Al_p : une valeur minimum (CoAl_m) et une valeur maximum (CoAl_M), (Poulenard et Herbillon, 2000) selon les équations 3 et 4 :

$$\text{pour C/Al}_p \text{ molaire} = 13 \quad \text{« CoAl}_M = 12 \text{Al}_p \text{ » , (\%)} \quad (3)$$

$$\text{pour C/Al}_p \text{ molaire} = 7 \quad \text{« CoAl}_m = 7,5 \text{Al}_p \text{ » , (\%)} \quad (4)$$

Diffraction des rayons X sur poudre de sol

L'analyse minéralogique est effectuée sur des échantillons finement broyés à une granulométrie inférieure à 50 μ m. Les données permettant d'identifier et de quantifier les minéraux cristallins du sol sont obtenues à l'aide d'un diffractomètre Philips MPD 3710 équipé d'une anticathode de cobalt.

Mesure de la stabilité des agrégats

La stabilité structurale du sol est étudiée suivant une méthode dérivée de Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de sol séché à l'air préparé et tamisé à 2 mm (sol total 0-2 mm) sont introduits dans un tamis de 200 μ m dont la base est mise en immersion dans un bécher de 250 ml contenant 100 ml d'eau déminéralisée. Après 2 heures d'immersion, le tamis est soumis à un mouvement de va-et-vient vertical pendant 6 minutes, le bécher restant fixe (amplitude de 1,3 cm, fréquence de 33 cycles par minute) permettant une alternance d'émersions et d'immersions de l'échantillon dans l'eau. La fraction restante sur le tamis (> 200 μ m) est séchée à 105 °C pendant 16 heures puis pesée. Cette fraction est composée de macroagrégats stables (MA, > 200 μ m) et de sables grossiers (SG). Les SG sont extraits en tamisant la fraction > 200 μ m dans

de la soude diluée, puis séchés à 105 °C. La teneur en MA est alors calculée par différence entre la fraction > 200 µm et SG. La fraction < 200 µm recueillie dans le bécher est transvasée dans une allonge de 100 mL, et agitée par 30 retournements manuels. Après un temps de sédimentation dépendant de la température (loi de Stokes), une aliquote de la fraction < 20 µm, ou microagrégats (MI, < 20 µm), est pipetée, séchée pendant 16 heures à 105 °C, puis pesée. Les mésoagrégats (ME, 20-200 µm) sont calculés par l'équation 5 :

$$ME = \text{Sol total} - (SG + MA + MI) \quad (5)$$

Mesures respirométriques

La respirométrie est un test de minéralisation du C effectué dans des conditions standard (28 °C, 28 jours) de laboratoire. Il est appliqué ici pour 2 modes de préparation des échantillons de sol en vue d'évaluer le niveau de protection physique du C vis-à-vis de la minéralisation : des échantillons de sol 0-2 mm, non broyés et des échantillons de sol 0-2 mm broyés à 0,2 mm (agrégats détruits, matière organique déprotégée). La différence, entre les deux modes de préparation, des quantités de C-CO₂ émis par le sol permet d'évaluer la protection du C dans les conditions expérimentales choisies. On opère de la façon suivante : 10 g de sol 0-2 mm, broyé ou non broyé et 20 g de sable inerte sont mis dans une coupelle d'incubation de 44 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. Le tout est mélangé de façon homogène, tassé à une même densité apparente et porté à une humidité équivalente à 80 % de l'humidité à la capacité au champ (pF = 2) du mélange sol + sable. La coupelle est mise dans un flacon étanche d'incubation de 1 000 ml mis à incuber à l'étuve à 28 °C. Le C-CO₂ dégagé dans le flacon est dosé aux 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 15, 18, 21 et 28^e jours par chromatographie en phase gazeuse (CPG MTI Agilent M 200). L'atmosphère du flacon est renouvelée après chaque dosage. Il y a 3 répétitions d'incubation par échantillon.

Traitement statistique

Les données sont comparées entre elles par le test *t* de Student de comparaison de moyennes. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

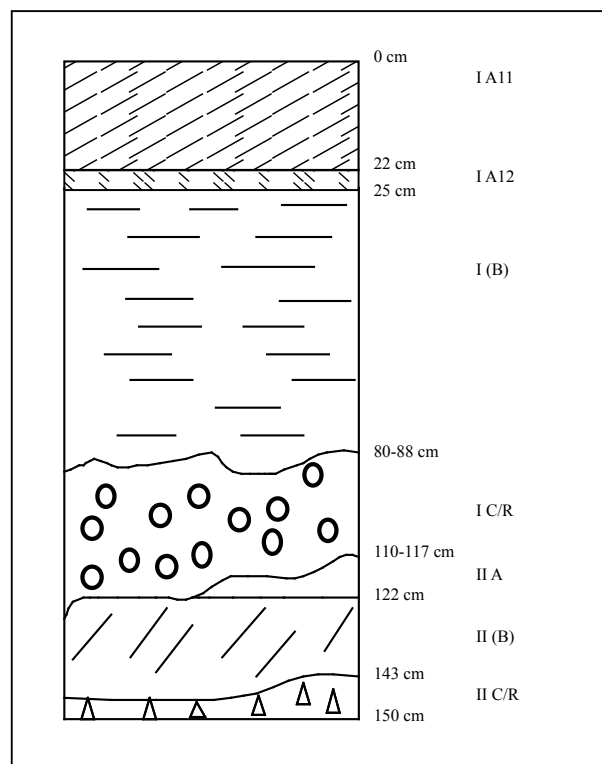
RÉSULTATS

Profil type, description, analyses et classification

Le profil type montré sur la *figure 2* et décrit dans le *tableau 3* a été effectué sur une jachère proche du terrain d'expérimentation. Le profil en place est composé principalement de deux sols superposés, dénommés sol I et sol II. Le sol I, de couleur rouge à rouge jaunâtre, s'est développé sur un dépôt de sédiments assez récent, avec un horizon I C/R dont les lithoreliques des sédiments

Figure 2 -Profil pédologique du sol. Andranomanelatra, Madagascar

Figure 2 - Soil profile at Andranomanelatra, Madagascar



originels sont encore observables dans l'horizon sus-jacent I (B). Les horizons A et B sont de texture argileuse et l'horizon II C/R est sablo-argileux. La porosité (macro- et microporosité) est assez bonne sur l'ensemble des horizons du sol I, même si une couche plus compacte est observée au niveau de l'horizon I (B). Les transitions entre horizons sont généralement graduelles. Le sol II commence brutalement à partir de l'horizon II A. Il est plus humide, de couleur plus foncée que le sol I, et très argileux jusque dans l'horizon II C/R. L'horizon II A est discontinu à certains endroits du profil, probablement décapé lors du dépôt du sédiment I C/R, alors que l'horizon II B est continu et présente des traces d'activité biologique, notamment des galeries de vers de terre. Les horizons II (B) et II C/R contiennent des matériaux très hétérogènes, bariolés, de couleur rouge, marron et noir, résultant de l'altération de la roche ou des sédiments originels. La porosité (macro- et microporosité) est assez bonne sur l'ensemble des horizons du sol II.

Les différentes analyses effectuées sur les horizons supérieurs du sol I (horizons I A₁₁, I A₁₂ et I (B), *tableau 4*) montrent des pH et des taux de saturation du complexe d'échange (TS) relativement bas, et la CEC est de l'ordre de 14 cmol.kg⁻¹ argile. Toutefois, dans la classification américaine (Soil Survey Staff, 2003), ce sol ne peut

Tableau 3 - Caractéristiques morphologiques du profil pédologique.**Table 3** - Morphological characteristics of soil profile.

Horizon	Profondeur	Couleur (humide)	Texture	Structure	Racines	Porosité	Particularités
I A11	0-22 cm	5 YR 4/6	Argileuse	Grumelleuse	+++	+++	
I A12	22-25 cm	2,5 YR 3/6	Argileuse	Polyédrique fine, de l'ordre de 1cm	+++	+++	
I (B)	25-88 cm	2,5 Y/R 4/6 (30 cm)	Argileuse	25-30 cm : Polyédrique grossière, de l'ordre de 5 cm	++	++	Couleur graduelle
		5 YR 4/6 (70 cm)	Argileuse	50- 65 cm : massive et prismatique	+	+	A 65-88 cm : présence de petits lithoreliques blanches et concrétions ferromanganifères
				65-88 cm : prismatique peu compact	++	++	
I R (C)	80-117 cm	10 YR 5/6	Sablo-argileuse	Friable	+	+++	Présence de lithoreliques grossières de 5 cm contenant des concrétions ferro-manganifères
II A	110-122 cm	7,5 YR 4/4	Argileuse	Polyédrique grossière, de l'ordre de 5 cm	+	++	Horizon discontinu
II (B)	122-146 cm	7,5 YR 4/4 à 4/6	Argileuse	Surstructure prismatique et structure polyédrique grossière	+	++	Horizon très hétérogène (plages rouge, marron, et noir) Présence de revêtements d'argile, de cutanes ferromanganifères, et des traces d'activité biologique
II R (C)	143-150 cm	7,5 YR 5/6 à 4/6	Argileuse	Idem que II (B)	tr	++	Horizon plus homogène

,+++ : beaucoup, ++ : moyen, + : peu, tr : trac

être considéré parmi les Oxisols du fait de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile, et de l'enrobage des lithoreliques par des sesquioxides de fer. Ceci nous conduit à considérer ce sol comme un Inceptisol. Les valeurs d'oxalfe (légèrement supérieures à 1 % dans la plupart des horizons) et de la densité apparente (systématiquement inférieures à l'unité), permettent de classer ce sol dans un sous-groupe andique. Il s'agit donc d'un andic Dystrustept dans la Soil Taxonomy. Rappelons que Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) l'avaient classé (classification française, CPCS, 1967) comme Sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide. D'après le World Reference Basis (FAO, 1998), ce sol est classé comme étant un Ferralsol.

Densités apparentes, teneurs et stocks de carbone

Les résultats présentés concernent la couche de sol entre 0 et 40 cm. Le *tableau 5* montre de faibles valeurs de densité apparente (Da) variant, toutes profondeurs confondues, de 0,71 à 1,04 g.cm⁻³. D'une manière générale, pour l'ensemble des traitements, les Da augmentent de la surface vers la profondeur. Da est plus élevée ($p < 0,05$) sous CT m/s que sous NT m/m-d, NT h/s-k et NT m/s à 0-5 cm de profondeur (0,89 contre 0,71, 0,77, 0,78 g.cm⁻³, $p < 0,05$) mais il n'y a plus de différence entre les différents systèmes à partir

de 5 cm de profondeur. Une différence de Da est observée entre NT h/s-k et NT m/m-d à 10-20 cm, avec une Da plus élevée sous NT h/s-k que sous NT m/m-d (0,89 g.cm⁻³ et 0,77 g.cm⁻³, respectivement) ; il n'y a toutefois pas de différence significative entre ces deux systèmes et NT m/s.

Les teneurs en C sont relativement élevées en surface (30 à 50 g C.kg⁻¹ sol entre 0 et 20 cm) et restent élevées en profondeur (14 à 19 g C.kg⁻¹ sol). A 0-5 cm, elles sont plus élevées ($p < 0,05$) sous NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k (50,2, 49,6 et 48,4 g C.kg⁻¹ sol) que sous CT m/s (34,0 g C.kg⁻¹ sol). On ne note pas de différence significative entre les 3 traitements NT.

Par rapport à CT m/s, les systèmes NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k présentent des teneurs en C du sol plus élevées, de 48, 46 et 42 % à 0-5 cm ($p < 0,05$), alors qu'à 20-30 et 30-40 cm, les teneurs en C sous ces systèmes ne sont pas différentes significativement à CT m/s.

Comme les valeurs de Da varient selon les différents systèmes étudiés, le stock de C doit être calculé à « masse de sol équivalente » (Ellert et Bettany, 1995). Pour cela, on choisit comme horizons de référence ceux du profil présentant les masses volumiques de sol les plus faibles. Ceci correspond ici à un profil élémentaire de l'une des trois parcelles du traitement NT m/m-d avec des masses de 1 411 Mg sol.ha⁻¹ pour la couche 0-20 cm (equiv 0-20 cm) et de 3 157 Mg sol.ha⁻¹ pour 0-40 cm (equiv 0-40 cm).

Tableau 4 - Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des horizons étudiés (profil sous NT).**Table 4** - Physico-chemical and mineralogical characteristics of soil profile horizons (NT treatment).

Horizons		I A ₁₁ (0-10 cm)	I A ₁₂ (20-30 cm)	I (B) (30-40 cm)
pH eau		5,72	4,96	4,84
pH KCl		4,9	4,6	5,08
C	g.kg ⁻¹ sol	45,55	20,9	13,5
C/N		14,75	17,49	16,03
Granulométrie				
Argile	g.100g ⁻¹ sol	61,9	69,7	65,4
Limons fins	g.100g ⁻¹ sol	10,4	6,6	7,00
Limons grossiers	g.100g ⁻¹ sol	8,4	3,8	4,5
Sables fins	g.100g ⁻¹ sol	7,5	7,1	8,1
Sables grossiers	g.100g ⁻¹ sol	11,8	12,8	14,9
Ca éch	cmol.kg ⁻¹ sol	4,24	0,3	0,22
Mg éch	cmol.kg ⁻¹ sol	2,82	0,2	0,15
K éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,56	0,16	0,23
Na éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,02	0,02	0,02
Somme (Ca,Mg,K,Na)	cmol.kg ⁻¹ sol	7,64	0,68	0,62
Al éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,58	0,59	0,48
H éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,01	0,01	0,01
CEC	cmol.kg ⁻¹ sol	17,32	10,24	8,63
CEC par kg d'argile	cmol.kg ⁻¹ argile	27,98	14,69	13,2
TS	%	44,13	6,66	7,21
Densités apparentes	g.cm ⁻³	0,76	0,95	1,00
Teneur en eau (pF 4,2)	g.100g ⁻¹ sol	23,36	22,02	22,55
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	57,9	70,95	73,15
Dissolution sélective				
Extraction au citrate-bicarbonate-dithionite				
Fe	g.kg ⁻¹ sol	46,62	44,86	42,11
Al	g.kg ⁻¹ sol	16,83	15,17	12,6
Si	g.kg ⁻¹ sol	3,07	3,37	2,92
Extraction à l'oxalate d'ammonium pH 3				
Fe _o	g.kg ⁻¹ sol	3,48	3,85	4,53
Al _o	g.kg ⁻¹ sol	11,99	11,78	11,53
Si _o	g.kg ⁻¹ sol	1,18	1,26	1,61
Oxalfe (Al _o + 1/2 Fe _o)	%	1,37	1,37	1,38
Allophane	%	0,84	0,90	1,14
Extraction au pyrophosphate de sodium				
Fe _p	g.kg ⁻¹ sol	3,04	1,11	0,39
Al _p	g.kg ⁻¹ sol	5,72	3,38	2,67
Si _p	g.kg ⁻¹ sol	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CoAl _M	%	6,86	4,06	3,2
CoAl _m	%	4,29	2,54	2,00
Diffraction par rayon X				
Quartz		++	++	++
Gibbsite		++	++	+++
Kaolinite		++ ou halloysite	++ ou halloysite	++ ou halloysite
Hématite		tr	tr	tr
Feldspath K		tr	tr	+
Magnétite			tr	

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Tableau 5 - Densités apparentes (Da) et teneurs en carbone (C) du sol. (Moyenne \pm écart-type, n=3)

Table 5 - Soil bulk density and C content of soils. (Mean \pm standard deviation, n=3).

	Da (g.cm ⁻³)	C (mg.g ⁻¹ sol)
0-5 cm		
CT m/s	0,89 \pm 0,02 b	34,0 \pm 1,2 a
NT m/s	0,78 \pm 0,06 a	50,2 \pm 4,0 b
NT m/m-d	0,71 \pm 0,03 a	49,6 \pm 1,9 b
NT h/s-k	0,77 \pm 0,07 a	48,4 \pm 5,3 b
5-10 cm		
CT m/s	0,87 \pm 0,09 a	35,2 \pm 0,5 a
NT m/s	0,86 \pm 0,05 a	40,9 \pm 4,0 ab
NT m/m-d	0,78 \pm 0,07 a	44,6 \pm 2,5 b
NT h/s-k	0,86 \pm 0,04 a	38,1 \pm 4,2 ab
10-20 cm		
CT m/s	0,87 \pm 0,06 ab	32,0 \pm 3,4 ab
NT m/s	0,84 \pm 0,05 ab	30,8 \pm 0,8 a
NT m/m-d	0,77 \pm 0,04 a	35,2 \pm 1,3 b
NT h/s-k	0,89 \pm 0,03 b	31,2 \pm 2,7 ab
20-30 cm		
CT m/s	0,92 \pm 0,06 a	26,8 \pm 4,8 a
NT m/s	0,95 \pm 0,02 a	20,9 \pm 3,1 a
NT m/m-d	0,92 \pm 0,05 a	24,2 \pm 2,4 a
NT h/s-k	0,98 \pm 0,03 a	20,5 \pm 1,1 a
30-40 cm		
CT m/s	0,98 \pm 0,04 a	19,3 \pm 3,2 ab
NT m/s	1,00 \pm 0,07 a	13,5 \pm 3,6 ab
NT m/m-d	1,01 \pm 0,01 a	19,0 \pm 1,1 b
NT h/s-k	1,04 \pm 0,04 a	14,6 \pm 2,5 a

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même profondeur, sont différentes significativement ($p < 0,05$).

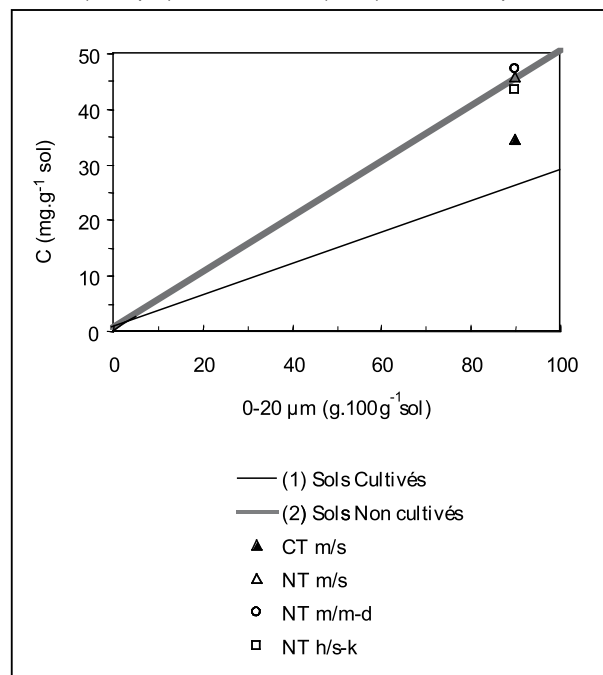
Tous traitements confondus, les stocks de C (*tableau 6*) varient de 47 à 58 Mg C.ha⁻¹ dans les couches equiv 0-20 cm et de 90 à 98 Mg sol.ha⁻¹ pour les couches equiv 0-40 cm. Pour equiv 0-20 cm, les stocks de C sous NT h/s-k ne sont pas significativement différents de CT m/s, alors que ceux sous NT m/s et NT m/m-d (55,0 et 58,5 Mg C.ha⁻¹) sont significativement plus élevés ($p < 0,05$) que CT m/s (47,4 Mg C.ha⁻¹), correspondant à des stockages annuels respectifs de 0,69 et 1,01 mg C.ha⁻¹.an⁻¹ sur 11 ans pour les 2 traitements. Pour la couche equiv 0-40 cm, les stocks de C sous NT ne sont pas différents ($p > 0,05$) de ceux sous CT m/s.

Stabilité des agrégats de sol

En général, la teneur en macroagrégats stables (MA) varie de

Figure 3 - Teneurs en C en fonction de la teneur en éléments fins (argile + limons fins) du sol selon Feller et al. (1991). Profondeur 0-10 cm.

Figure3 - Relationships between soil C contents and soil texture (0-20 μ m) as Feller et al. (1991). 0-10 cm depth.



522 à 691 g.kg⁻¹ sol, indiquant une bonne stabilité structurale pour ce type de sol (*tableau 7*). Cette teneur est plus élevée ($p < 0,05$) sous NT m/m-d, NT h/s-k et NT m/s (606, 643 et 691 g.kg⁻¹ sol, respectivement) que sous CT m/s (522 g.kg⁻¹ sol) à 0-5 cm, alors qu'aucune différence significative n'est observée à 5-10 cm. Pour les trois systèmes en SCV, la teneur en MA est plus élevée sous NT m/s que sous NT m/m-d et/ou NT h/s-k à 0-5 cm. Pour les mésoagrégats (ME), une tendance inverse à celle de MA est observée, avec, à 0-5 cm, des teneurs plus élevées ($p < 0,05$) pour CT m/s (301 g.kg⁻¹ sol) que pour NT h/s-k et NT m/s (188 et 150 g.kg⁻¹ sol, respectivement). La teneur en ME sous NT m/m-d n'est toutefois pas différente de celle sous CT m/s. Les microagrégats (MI) sont en très faibles quantités (< 46 g.kg⁻¹ sol) et aucune différence significative entre les traitements n'a été détectée. La dispersabilité de ce sol apparaît comme étant faible.

Respirométrie

L'étude a porté sur les seuls échantillons 0-5 cm des traitements CT m/s et NT m/s. En 28 jours, le C minéralisé (C-CO₂) sous NT m/s est toujours plus élevé ($p < 0,05$) que celui minéralisé sous CT m/s, que ce soit pour les échantillons broyés ou non broyés (*tableau 8*). L'effet du broyage n'est pas significatif ($p > 0,05$), bien que les valeurs de C-CO₂ minéralisé par les échantillons broyés

soient systématiquement plus élevées que celles des échantillons non broyés. Sur la totalité des 28 jours, cet effet est légèrement plus élevé pour NT m/s ($198 \mu\text{gC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ sol) que pour CT m/s ($49 \mu\text{gC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ sol).

DISCUSSION

Type de sol et teneur en C

De la minéralogie et de la texture dépend le niveau de stockage de C dans le sol, et les sols à caractère andique présentent généralement, pour une même texture, des stocks plus élevés que les sols à argiles cristallisées de type 1:1 ou 2:1 (Feller et Beare, 1997). Le sol étudié ici est argileux et présente quelques caractéristiques andiques. Ce caractère andique est dû à la fois à la présence de produits allophaniques (de l'ordre de 1 %) et de complexes organométalliques (2 à 6 % pour les complexes organo-aluminiques). Ceci s'explique par l'existence à faible distance de sites de volcanisme récent à pyroclastite, le sol étudié, développé sur colluvions volcano-lacustre, ayant pu incorporer des matériaux (projections + sédiments) à caractère vitreux. Tout concourt donc à ce que ce sol présente des teneurs en C élevées : texture argileuse, propriétés andiques. Feller *et al.* (1991) ont montré pour les sols tropicaux bien drainés à argile cristallisée (de type 1:1 ou 2:1) que les stocks de C dépendent fortement de la texture (teneur en argile + limon fin, 0-20 μm), tant en milieu naturel que cultivé.

Les échantillons étudiés ici appartiennent bien au domaine de C décrit par Feller *et al.* (1991) (figure 3), entre la droite 1 des « sols cultivés » (à faible niveau de restitution organique) et la droite 2 des « sols non cultivés » (sols sous végétation pérenne à forts niveaux de restitution organique). On constate toutefois que la valeur du traitement CT m/s (à faible niveau de restitution) est nettement au-dessus de la droite 1 ($35 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ sol au lieu de $25 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ sol) pour l'horizon 0-10 cm. Cette différence de l'ordre de $10 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ sol, entre la valeur mesurée et la valeur « théorique », pourrait représenter l'effet additionnel dû à la fois au climat subtropical frais et au caractère andique du sol. De même, les valeurs mesurées de NT, qui sont proches de la droite 2, apparaissent élevées par rapport aux prédictions de Feller *et al.* (1991) qui les situeraient à égale distance des droites 1 et 2.

Systèmes SCV et stocks de C du sol

Les stocks de C sous NT et CT ne sont significativement différents que sur une profondeur équivalente de 20 cm (correspondant à une masse de terre constante de $1\,411 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Par rapport au système labouré (CT m/s), les accroissements des stocks de C sous systèmes NT sont respectivement de 0,69 et $1,01 \text{ mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sous couverture végétale morte (NT m/s) et vivante (NT m/m-d) pour la couche équivalente 0-20 cm. Ce stock

est relativement élevé par rapport aux valeurs de stockage de C dans le sol pour des systèmes en semis direct en régions tropicales et subtropicales, qui sont de l'ordre de $0,35 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (Six *et al.*, 2002) à $0,51 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (Bayer *et al.*, 2000), mais concernant des effets stricts non-labour. Dans cette étude, le stockage mesuré sous NT combine à la fois l'effet du non-travail du sol et de la restitution des résidus de récoltes.

Pour la couche équivalente à 0-40 cm (masse de sol = $3\,157 \text{ Mg}$), les différences entre systèmes NT et CT m/s ne sont plus significatives, dues aux teneurs en C légèrement supérieures à 20-30 cm pour CT m/s par rapport aux trois autres systèmes NT. Ces teneurs plus élevées sous CT pourraient provenir, d'une variabilité initiale des teneurs en C et non pas d'un effet traitement car le labour n'est effectué que jusqu'à 20 cm de profondeur.

Ces valeurs élevées de stockage de C sous NT, de 0,69 et $1,01 \text{ mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans la couche équivalente à 0-20 cm, peuvent s'expliquer par trois facteurs : (i) la quantité importante de carbone restitué au sol par ces systèmes, (ii) une protection du C contre la minéralisation particulièrement importante dans ce type de sol, mais aussi (iii) un contrôle des pertes de C par érosion. Les restitutions de C (tableau 2, colonne 4) ont été estimées, durant les 11 ans d'expérimentation, à $8 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour CT m/s (restitutions racinaires uniquement), et à respectivement 40, 70, et $62 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k (restitutions aériennes et racinaires), soit un surplus de biomasse restituée par les systèmes SCV de 32, 62 et $54 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tableau 2, colonne 5). Avec l'hypothèse que 15 % du C restitué sont stockés dans le sol au cours de l'année (Rasmussen et Collins, 1991), on obtiendrait un niveau de stockage théorique supplémentaire sur les trois systèmes SCV de 0,44 et 0,84 et $0,73 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, respectivement pour NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k. Ces valeurs sont sensiblement plus faibles que celles mesurées dans cette étude pour NT m/s et NT m/m-d qui sont respectivement de 0,69 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et $1,01 \text{ mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, et un peu plus élevées pour le traitement NT h/s-k ($0,55 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Le niveau des restitutions expliquerait donc déjà une large part des différences de stocks de C. D'autres auteurs (Kong *et al.*, 2005) ont observé que seulement 7 % du C restitué sont susceptibles d'être stockés dans le sol. Dans ces conditions, les écarts entre les valeurs théoriques et les valeurs réelles de C stocké deviennent encore plus importants, laissant supposer l'existence d'un autre processus contrôlant le stockage de C : le contrôle de la perte de C par érosion. En effet, une perte en terre annuelle de $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, estimée suivant la relation entre teneur en MA stables et perte en terre établie par Barthès *et al.* (2000), occasionnerait une perte en C de $0,60 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$, soit l'équivalent des différences de stocks observées entre CT m/s et les 3 traitements NT. Toutefois, dans les deux scénarios, l'ordre de variation des stocks mesurés : NT m/m-d > NT m/s > NT h/s-k (tableau 6), ne varie pas dans le même sens que celui des stocks théoriques : NT m/m-d > NT h/s-k > NT m/s (tableau 1). D'autres facteurs seraient donc à prendre en considération, comme la qualité des restitutions (non étudiée ici), et la protection physique du C dans les agrégats de sol (un point discuté ci-dessous).

Systèmes SCV, stabilité de l'agrégation et protection physique du C

Tous échantillons considérés, la stabilité structurale du sol étudié apparaît élevée avec une teneur en macroagrégats stables (MA) comprise entre 606 et 770 g.kg⁻¹ sol-SG. Ceci est dû, tout à la fois, à la texture argileuse, aux teneurs élevées en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Bronick et Lal, 2005) et en MO (Feller et al., 1996), mais peut être aussi aux activités microbiennes et fauniques (Amézqueta, 1999 ; Blanchart et al., 2004 ; Bronick et Lal, 2005).

Même avec cette stabilité élevée, 11 années de traitement NT ont permis, par rapport au traitement CT, une augmentation d'environ 16 à 33 % du taux de macroagrégats stables. Cette teneur en MA, tous traitements et profondeurs confondus (0-5 et 5-10 cm), est corrélée positivement ($R = 0,41$; $p < 0,05$) à la teneur en C du sol (figure 4). De nombreux travaux en milieu tropical ont montré l'existence de corrélations positives et significatives entre la teneur en C et la stabilité des agrégats du sol (Beare et al., 1994a ; Feller et al., 1996 ; Six et al., 2000 ; Razafimbelo et al., 2003 ; Mikha et Rice, 2004). Si les agrégats sont plus stables sous l'effet des pratiques SCV, on peut ainsi faire l'hypothèse que le C sera plus protégé physiquement contre la minéralisation au sein de ces agrégats par la limitation de l'activité des microorganismes par manque d'eau et d'oxygène (Balesdent et al., 1999). C'est ce que nous avons testé par la respirométrie sur échantillons non broyés (intacts) et broyés à 200 µm, ce qui correspond, en première approximation, à une destruction des MA.

On observe une tendance générale de protection physique du C par les MA puisque, pour tous les échantillons (CT et NT), le C minéralisé du sol broyé est plus élevé que celui du sol non broyé (tableau 8a), bien que les différences ne soient pas significatives. Les quantités de C protégé seraient plus importantes sous NT (environ 200 µg C-CO₂.g⁻¹ sol) que sous CT (50 µg C-CO₂.g⁻¹ sol). Le niveau de C protégé ne représenterait que 15 % du C total minéralisé, une valeur faible par rapport à celles observées dans la littérature. Par exemple, Chevallier et al. (2004), pour un vertisol sous prairie à la Martinique, trouvent des valeurs de C protégé supérieures à 35 % du C total minéralisé. Les taux de minéralisation du C (tableau 8b), bien que faibles par rapport à la littérature (Chevallier et al., 2004), sont plus importants sous NT que sous CT, ce qui indiquerait la présence d'un compartiment labile plus important de MO stockée sous NT, alimenté par les résidus organiques frais et la MO soluble provenant du paillis.

Le niveau de protection physique du C dans cette étude est faible. Compte tenu du protocole opératoire, broyage à 200 µm, il n'a été toutefois appréhendé que pour les MA. Il est donc possible que des sites de protection efficaces

Tableau 6 - Stocks de C exprimés pour une masse de sol équivalente des couches 0-20 cm et 0-40 cm (1 411 et 3157 Mg sol. ha⁻¹). (Moyenne ± écart-type, n=3).

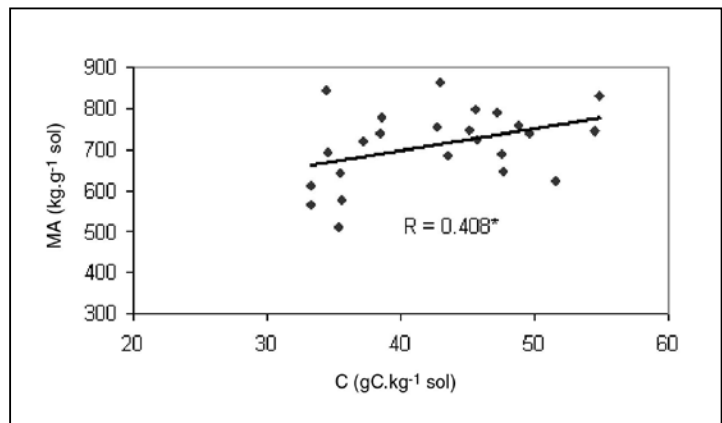
Table 6 - Soil C stocks in equivalent soil mass of 0-20 cm (1 411 Mg soil.ha⁻¹) and 0-40 cm (3 157 Mg soil.ha⁻¹) horizons. (Mean ± standard deviation, n=3).

	C (Mg C.ha ⁻¹ sol)	
	1411 Mg sol. ha ⁻¹ (1) Equiv. 0-20 cm	3157 Mg sol. ha ⁻¹ (1) Equiv. 0-40 cm
Stocks de C		
CT m/s	47,4 ± 1,2 a	92,1 ± 7,3 a
NT m/s	55,0 ± 2,2 b	89,7 ± 4,0 a
NT m/m-d	58,5 ± 1,8 b	98,0 ± 3,9 a
NT h/s-k	53,4 ± 4,1 ab	89,2 ± 5,3 a
Stockage annuel de C		
NT m/s	0,69 ± 0,23 a	-
NT m/m-d	1,01 ± 0,20 a	-
NT h/s-k	0,55 ± 0,39 a	-

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même profondeur, sont différentes significativement ($p < 0,05$).

Figure 4 - Relation entre teneurs en C et en MA, aux profondeurs 0-5 et 5-10cm (n= 24, $p < 0,05$).

Figure 4 - Correlation between soil C content and stable macroaggregates, at 0-5 and 5-10 cm depth (n= 24, $p < 0,05$).



existent dans ce sol, mais au niveau des méso- et microagrégats, un point qui est en cours d'étude. Enfin, la matière organique pourrait aussi être protégée contre la minéralisation par d'autres processus non étudiés ici, comme la protection physico-chimique par adsorption sur les colloïdes minéraux du sol et/ou la récalcitrance biochimique selon la composition des MO du sol.

Tableau 7 - Teneurs en sables grossiers (SG), macroagrégats stables à l'eau, MA (200-2 000 μm), mésoagrégats, ME (20-200 μm) et microagrégats, MI (< 20 μm) à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Résultats exprimés par rapport au sol total (colonnes 3 à 5) ou par rapport au sol-SG (colonnes 6 à 8). (Moyenne \pm écart-type).

Table 7 - Coarse sand (SG), water stable macroaggregates, MA (200-2 000 μm), mesoaggregates, ME (20-50 μm) and microaggregates, MI (< 20 μm) contents of soils at 0-5 and 5-10 cm depth. (Mean \pm standard deviation).

	(g.kg ⁻¹ sol)				(g.kg ⁻¹ sol-SG)		
	SG	MA	ME	MI	MA	ME	MI
0-5 cm							
CT m/s	139 \pm 71 a	522 \pm 56 c	301 \pm 43 a	39 \pm 2 ab	606 \pm 38 b	349 \pm 39 a	45 \pm 1 ab
NT m/s	128 \pm 21 a	691 \pm 26 a	150 \pm 27 b	31 \pm 8 b	793 \pm 36 a	172 \pm 29 b	35 \pm 9 b
NT m/m-d	130 \pm 50 a	606 \pm 46 abc	239 \pm 69 ab	25 \pm 8 a	695 \pm 62 ab	275 \pm 71 ab	29 \pm 10 a
NT h/s-k	130 \pm 25 a	643 \pm 7 b	188 \pm 3 a	40 \pm 15 ab	739 \pm 13 b	216 \pm 4 a	46 \pm 16 ab
5-10 cm							
CT m/s	87 \pm 27 a	543 \pm 95 a	339 \pm 72 a	32 \pm 3 a	593 \pm 91 b	372 \pm 87 a	35 \pm 4 a
NT m/s	112 \pm 13 a	684 \pm 33 b	177 \pm 24 b	28 \pm 3 a	770 \pm 28 a	199 \pm 29 b	31 \pm 3 a
NT m/m-d	110 \pm 30 a	662 \pm 97 ab	206 \pm 82 ab	22 \pm 7 a	743 \pm 101 ab	232 \pm 93 ab	24 \pm 8 a
NT h/s-k	116 \pm 40 a	679 \pm 86 a	174 \pm 49 a	31 \pm 7 a	771 \pm 64 b	194 \pm 59 a	35 \pm 7 a

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).

Tableau 8 - C minéralisé sous NT m/s et CT m/s dans la couche 0-5 cm. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Table 8 - C mineralization of NT m/s and CT m/s in the 0-5 cm soil layer. (Mean \pm standard deviation, $n=3$).

		0-4 jours	4-15 jours	15-28 jours	0-28 jours	C protégé
		a) En $\mu\text{g C-CO}_2\text{.g}^{-1}$ sol				
CT m/s	Non broyé	195 \pm 26 a	207 \pm 26 a	143 \pm 14 a	545 \pm 66 a	49 \pm 105 a
	Broyé	232 \pm 36 a	219 \pm 41 a	144 \pm 20 a	594 \pm 97 a	
NT m/s	Non broyé	623 \pm 52 b	515 \pm 67 b	372 \pm 69 b	1510 \pm 184 b	198 \pm 365 a
	Broyé	779 \pm 140 b	577 \pm 135 b	352 \pm 70 b	1708 \pm 325 b	
		b) En mg C-CO ₂ .g ⁻¹ C sol				
CT m/s	Non broyé	6 \pm 1 a	6 \pm 1 a	4 \pm 0 a	16 \pm 2 a	1 \pm 3 a
	Broyé	7 \pm 1 a	7 \pm 1 a	4 \pm 1 a	18 \pm 3 a	
NT m/s	Non broyé	13 \pm 1 b	10 \pm 1 b	8 \pm 1 b	31 \pm 3 b	6 \pm 7 a
	Broyé	16 \pm 2 c	12 \pm 2 b	7 \pm 2 b	36 \pm 6 b	

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$, $n=3$).

CONCLUSION

Les systèmes semis direct avec couverture végétale étudiés, en restituant beaucoup de résidus organiques au sol, ont permis de stocker une quantité importante de C dans le sol variant de 0,69 à 1,01 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, par rapport au traitement labouré (CT), où les résidus sont exportés. Ces valeurs élevées sont alors attribuées principalement à la différence de niveau de restitutions organiques entre les deux systèmes, mais aussi probablement à un contrôle

plus marqué des pertes par érosion du C sous systèmes SCV. Ce stockage de C induit une augmentation de la stabilité structurale, déjà naturellement élevée dans ce type de sol, et en retour, celle-ci pourrait conduire à une protection physique du C contre la minéralisation. Toutefois cette protection n'apparaît pas importante pour les sites de taille supérieure à 200 μm . Il se pourrait que d'autres sites de taille plus petite soient concernés ainsi que les deux autres processus de protection : physico-chimique et biochimique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire d'Analyse du Sol du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, et le Service Commun de Diffraction des Rayons X du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement pour la caractérisation physico-chimique et minéralogique du sol étudié.

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 2004a - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol (NF X 31 107). *In* : Evaluation de la qualité des sols. Volume 1 : Méthodes d'analyse chimique. Afnor (Ed.). Paris.
- Afnor, 2004b - Détermination de la caractéristique de la rétention en eau. Méthode de laboratoire (ISO 11 274 : 1998). *In* : Evaluation de la qualité des sols. Volume 2 : Méthodes d'analyses physique et biologique. Afnor (Ed.). Paris.
- Albrecht A., Angers D. A., Beare M. H. et Blanchart E., 1998 - Déterminants organiques et biologiques de l'agrégation : implications pour la recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux. *Cahiers Agricultures*, 7, pp. 357-363.
- Amézketa E., 1999 - Soil aggregate stability : A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, pp. 83-151.
- Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 1999 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 215-230.
- Barthès B., Azontondé A., Boli B. Z., Prat C. et Roose E., 2000 - Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*, 51, pp. 485-495.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L. et Fernandes S. V., 2000 - Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54, pp. 101-109.
- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 777-786.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 787-795.
- Blakemore L. C., Searle P. L. et Daly B. K., 1987 - Methods for chemical analysis of soils. Lower Hutt, New Zealand Society of Soil Science, pp. 44-45.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G., Decaens T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L. et Roose E., 2004 - Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, pp. 303-315.
- Bronick C. J. et Lal R., 2005 - Soil structure and management : a review. *Geoderma*, 124, pp. 3-22.
- Caner L., Bourgeon G., Toutain F. et Herbillon A. J., 2000 - Characteristics of non-allophanic Andisols derived from low-activity clay regoliths in the Nilgiri Hills (Southern India). *European Journal of Soil Science*, 51, pp. 553-563.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et Feller C., 2004 - The physical protection of soil organic carbon in aggregates : a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103, pp. 375-387.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Document ronéoté, 96 p.
- Ellert B. H. et Bettany J. R., 1995 - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, pp. 529-538.
- FAO, 1998 - World reference base for soil resources. Rome, Italy, FAO, ISRIC, ISSS.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, pp. 69-116.
- Feller C., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. *In* : Structure and organic matter storage in agricultural soils. Carter M. R. et Stewart B. A. (Eds). CRC Press, New York.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., 1991 - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 26, pp. 25-36.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994 - Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32, pp. 1043-1068.
- Gupta V. V. S. R. et Germida J. J., 1988 - Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 20, pp. 777-786.
- Halvorson A. D., Wienhold B. J. et Black A. L., 2002 - Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 66, pp. 906-912.
- IPCC, 2001 - Climate Change 2001 - The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding V., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P., X. D. et Maskell K. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- Kemper W. D. et Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. *In* : Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs. Klute A. (Ed.). Madison, WI.
- Kong A. Y. Y., Six J., Bryant D. C., Denison R. F. et Van Kessel C., 2005 - The relationship between carbon input, aggregation and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 69, pp. 1078-1085.
- McKeague J. A. et Day J. H., 1966 - Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 46, pp. 13-22.
- Mehra P. et Jackson M. L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, pp. 317-327.
- Mikha M. M. et Rice C. W., 2004 - Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68, pp. 809-816.
- Parfitt R. L. et Wilson A. D., 1988 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *In* : Volcanic soils, weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt. Caldas E. F. et Yaalon D. H. (Eds). Catena (Suppl. 7).
- Poulenard J. et Herbillon A. J., 2000 - Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 331, pp. 651-657.
- Rasmussen P. E. et Collins H. P., 1991 - Long-term impacts of tillage fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 45, pp. 93-134.
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., 1998 - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. *In* : Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.
- Razafimbelo T., Barthès B., De Luca E. F., Larré-Larrouy M. C., Laurent J.-Y., Cerri C. C. et Feller C., 2003 - Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil.

- Etude et Gestion des Sols, 10, pp. 191-200.
- Sà J. C. d. M., 2001 - *Dinamica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto*. Escola superior de Agricultura Luiz de Quieroz Universidade de Sao Paulo. Piracicaba, Universidade de Sao Paulo, 141 p.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002 - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, pp. 755-775.
- Six J., Paustian K., Elliott E. T. et Combrink C., 2000 - Soil structure and organic matter : I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, pp. 681-689.
- Soil Survey Staff, 2003 - *Keys to Soil Taxonomy*. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Wada K. et Higachi T., 1976 - The categories of aluminium- and iron-humus complexes in ando soils determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*, 27, pp. 357-368.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - *Carte pédologique de Madagascar au 1/100.000*. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM).

